

KATHODENPOROSITÄT UND FLICKERRAUSCHEN (FUNKELEFFEKT)*

Von

I. P. VALKO und F. FISCHER

Lehrstuhl für Elektronenröhren an der Technischen Universität, Budapest und
Forschungsinstitut für die Nachrichtentechnische Industrie, Budapest

Bei Elektronenröhren mit Oxydkatoden kann das Rauschen bei niedrigen Frequenzen beträchtliche Werte annehmen, dieses Rauschen wird allgemein Funkeleffekt oder Flickerrauschen genannt. Bekanntlich wird das Schrotrauschen durch die Annahme erklärt, daß einzelne Elektronen unabhängig von einander auf die Anode auftreffen und dadurch sehr kurze Stromimpulse verursachen. Das Frequenzspektrum dieser sehr kurzen Impulse ist in einem weiten Bereich konstant, womit die Frequenzunabhängigkeit des Schrotrauschens bis zu den höchsten Frequenzen erklärt werden kann.

Anders liegt der Fall beim Flickerrauschen. SCHOTTKY nahm als erster an, daß die Elektronen nicht einzeln sondern in Bündeln emittiert werden. Dadurch entstehen Impulse mit einer größeren Amplitude und größeren Zeitdauer.

Längere Impulse haben ein Fourier-Spektrum, dessen Amplituden gegen höhere Frequenzen abklingen. Die Impulsdauer ist außerdem nicht bei allen Impulsen gleich, sondern streut innerhalb eines großen Bereiches. Die so entstehenden Frequenzspektren, die also verschieden verlaufen, überlagern sich, womit die Art der Frequenzabhängigkeit des Flickerrauschens erklärt werden kann. Diese ist erfahrungsgemäß ungefähr proportional $1/f$.

SCHOTTKY erklärte seine Annahme der Elektronenbündel mit dem Vorhandensein von Emissionszentren auf der Kathodenoberfläche, die beobachteten Vorgänge konnten jedoch durch diese Annahme quantitativ nicht restlos erklärt werden. Die Forschungen auf diesem Gebiet wurden fortgesetzt und führten in neuester Zeit noch zu anderen Hypothesen wie z. B. der von LINDEMANN und VAN DER ZIEL [1], die die Ursache des Flickerrauschens in der Porosität der Kathodenoberfläche sahen. Ihre Annahme stützt sich auf Ergebnisse von LOOSJES und VINK, nach denen in den Poren der Kathode ein Elektronengas entsteht. Nach LINDEMANN und VAN DER ZIEL zeigt die Feldstärke in den Poren an der Oberfläche der Kathode spontane Schwankungen, wodurch die Anzahl der aus der Kathode austretenden und zur Anode weiter-

* Erweiterter Text eines Vortrages gehalten an der Festkörpertagung deutscher und ungarischer Physiker am 16. September 1959 in Balatonfüred.

gehenden Elektronen moduliert wird. Diese Verfasser folgerten daraus, daß bei geringerer Porosität der Kathode die Schwankungen der Feldstärke und damit das Flickerrauschen auch kleiner würden und sie benutzten deshalb für ihre Versuche eine Röhre mit einer dichteren Kathodenschicht. Vergleichsmessungen an Röhren mit verschiedener Kathodenporosität wurden von ihnen nicht vorgenommen.

Im elektronischen Laboratorium des Forschungsinstitutes für die Nachrichtentechnische Industrie in Budapest wurde daher beschlossen den Einfluß der Kathodenporosität auf das Flickerrauschen näher zu untersuchen.

Bevor jedoch diese Frage weiter untersucht wurde, schien es zweckmäßig andere Eigenschaften des Flickerrauschens zu studieren. Deshalb wurde

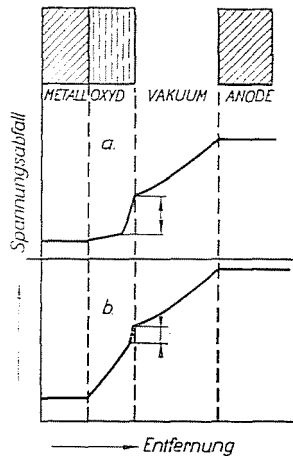


Bild 1. Spannungsabfall in der Oxydkathode. a) bei poröser Kathode, b) bei zusammengesinteter Kathode. Der Kathodenstrom ist in beiden Fällen gleich

die Amplitudenverteilung und die Frequenzverteilung des Flickerrauschens gemessen, wozu eine besondere Meßvorrichtung entwickelt wurde. Diese Meßvorrichtung besteht aus einem stabilen Verstärker mit der konstanten Verstärkung von 120 dB in einem Frequenzbereich von 0.5 Hz bis 70 kHz; das Gerät, welches Rauschmessungen bei niedrigen und mittleren Frequenzen ermöglichte, wurde an anderer Stelle beschrieben [2]. Zur Aufnahme der Amplitudenverteilung diente außerdem ein Schleifenoszillograph von RFT, während die Frequenzverteilung mit dem Tonfrequenzspektrometer von Bruel und Kjaer gemessen wurde. Bild 2 zeigt die Amplitudenverteilung des Flickerrauschens. Die Messung erfolgte an einem System der Doppeltriode ECC 85. Die Aufnahmezeit betrug 47 Sekunden. Die Häufigkeit der gemessenen Amplituden wurde im Wahrscheinlichkeitsmaßstab abgebildet und man sieht, daß die einzelnen Meßwerte mit guter Annäherung auf einer Geraden liegen. Das bedeutet also, daß die Amplituden des Flickerrauschens Gauss'sche Verteilung

haben, was bis jetzt nur für das Schrotrauschen einwandfrei festgestellt wurde. Ist aber die Amplitudenverteilung bekannt, so können Vergleichsmessungen mit einem Spitzenspannungsmeßgerät durchgeführt werden, weil der Zusammenhang zwischen dem angezeigten Spitzenwert und dem echten effektiven Wert durch die Zeitkonstante des verwendeten Meßgerätes gegeben ist.

Diese Folgerung war sehr wichtig weil das Spektrometer von Bruel und Kjaer einen Spitzenspannungsmesser enthält. Es besitzt außerdem 30 verschiedene Terzfilter, deren mittlere Frequenzwerte von 40 Hz bis 31,5 kHz gehen. Die Gesamtverstärkung beträgt 100 dB. Im Anhang werden einige mit dem Spektrometer aufgenommene Kurven des Frequenzspektrums gezeigt,

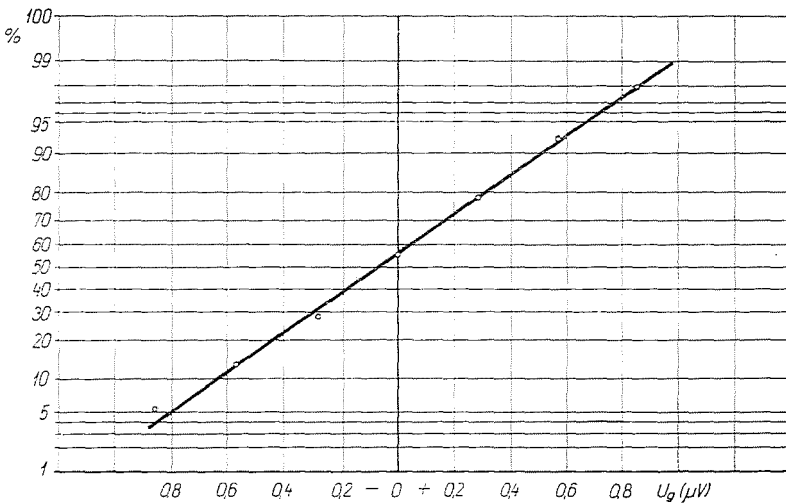


Bild 2. Verteilung der Amplituden des Flickerrauschens. Die gemessenen Punkte sind im Wahrscheinlichkeitsmaßstab abgebildet und schmiegen sich einer Geraden an, was auf Gauß'sche Verteilung hindeutet

die die Abhängigkeit $1/f$ der Rauschleistung bei niedrigen Frequenzen bestätigen. Diese Untersuchungen ermöglichen es bei unseren Messungen Flicker- und Schrotrauschen zu trennen.

Es soll jetzt auf die Wirkung der Kathodenporosität näher eingegangen werden. Weil die Porosität der Kathode nicht direkt gemessen werden konnte, stützen sich die Untersuchungen auf folgenden Gedankengang: Es ist bekannt, daß sich die Porosität der Kathode mit der Umwandlungstemperatur ändert u. z. so, daß die Kathode bei steigender Umwandlungstemperatur zusammensintert [3]. Selbst wenn sich die Kathodenoberfläche durch das Zusammensintern der Kathode nicht bedeutend ändert, tritt eine wesentliche Änderung der Feldverteilung in der Emissionsschicht auf. Durch den größeren Querwiderstand der Emissionsschicht der zusammengesinterten Kathode wird nämlich der Anteil des Spannungsabfalls in der Oberfläche der Kathode — und

damit auch die Schwankung der Feldstärke — kleiner werden. Bild 1a und b zeigt die Spannungsabfälle in Kathoden mit verschiedener Porosität. Der Kathodenstrom ist in beiden Fällen gleich. Dies berechtigt also zur Annahme, daß stärker zusammengesinterte Kathoden kleineres Flickerrauschen haben. Diese Annahme wurde durch die ersten Versuche mit 100 Röhren von Typ EBF 80 gerechtfertigt, worüber an anderer Stelle berichtet wurde [4]. Dieser Versuch ergab, daß das Flickerrauschen mit steigender Umwandlungstempera-

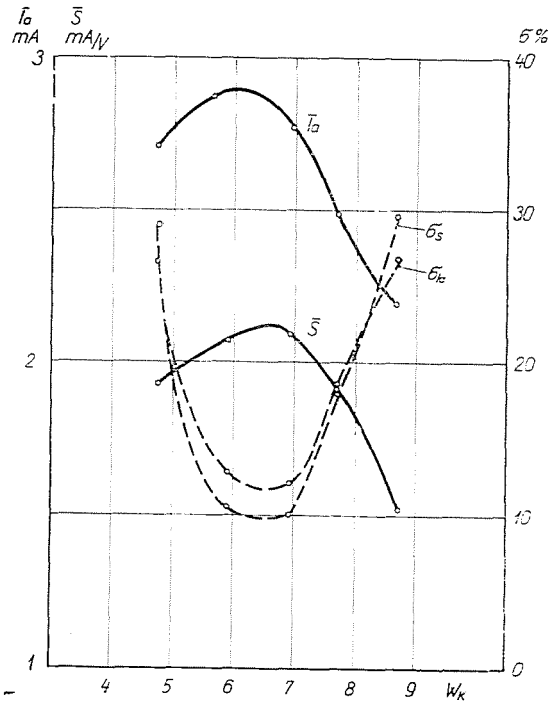


Bild 3. Abhängigkeit der Mittelwerte und der Streuungen der Anodenströme und Steilheiten von der Umwandlungsleistung W_k

tur bedeutend abnahm, während das Schrotrauschen sich nicht änderte. Die Hypothese von LINDEMANN und VAN DER ZIEL konnte also durch diesen Versuch experimentell unterstützt werden.

Zur besseren quantitativen Klärung dieser Tatsache und zur Kontrolle der Ergebnisse des ersten Versuches wurde das Experiment an 100 Röhren vom Typ EF 86 wiederholt. Die Röhren wurden in fünf Gruppen zu je 20 Stück geteilt und die Karbonate der Kathoden jeder Gruppe mit einer anderen Temperatur umgewandelt. Die Änderung der Umwandlungstemperatur wurde durch die Änderung der Heizleistung an der Pumpe vorgenommen. Nach dem Pumpvorgang wurden alle Röhren gemeinsam mit etwas erhöhter Heizspannung und normaler Arbeitspunkteinstellung gebrannt und danach wurde das

Flicker- und Schrotrauschen gemessen. Außerdem wurden der Anodenstrom, die Steilheit, sowie die unterheizten Werte dieser beiden Parameter gemessen. Bild 3 zeigt die Änderung des Mittelwertes des Anodenstromes und der Steilheit (\bar{J}_a , \bar{S}) sowie die Änderung der relativen Streuung dieser beiden Parameter in Abhängigkeit von der Heizleistung W_k an der Pumpe, die die Umwandlungstemperatur bestimmt. Zwischen 6 bis 7 Watt Heizleistung durchlau-

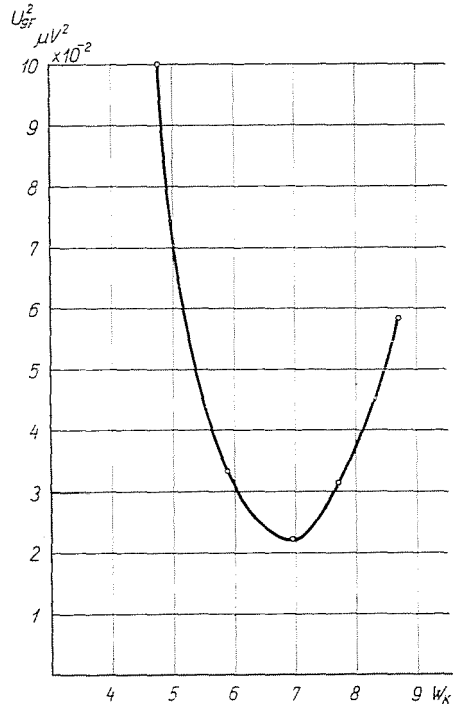


Bild 4. Quadrat der Rauschspannungen am Gitter der gemessenen Röhre in Abhängigkeit von der Umwandlungsleistung. Die Meßpunkte stellen die Durchschnitte der einzelnen Gruppen dar

fen die Mittelwerte der Steilheit und des Anodenstromes ein Maximum, während die relativen Streuungen bei denselben Werten ein Minimum durchlaufen. Das Flickerrauschen verhält sich ganz ähnlich, was man aus Bild 4 sieht. Hier sind die Quadrate der Rauschspannungen am Gitter der gemessenen Röhre in Abhängigkeit der Heizleistung W_k an der Pumpe aufgetragen. Auch dieser Versuch bewies erneut, daß das Flickerrauschen mit steigender Umwandlungstemperatur kleiner wird, jedoch zeigte sich außerdem, daß beim Steigern der Umwandlungstemperatur über einen gewissen Wert das Flickerrauschen wieder ansteigt. Bild 3 und 4 zeigen ferner, daß die optimalen Heizleistungen für die Röhrenparameter (ca. 6.5 W) und das Flickerrauschen (ca. 7 W) beinahe

zusammenfallen. Durch entsprechende Einstellung der Heizleistung an der Pumpe kann man also optimale Bedingungen sowohl für die statischen Parameter der Röhren, als auch für das Flickerrauschen schaffen. Der Grund für das Verhalten der Röhrenparameter soll hier nicht näher erläutert werden, er ist zur Genüge bekannt, es soll lediglich das Verhalten des Flickerrauschens besprochen werden. Eine plausible Erklärung für dieses Verhalten wäre die Tatsache, daß mindestens zwei Vorgänge für die Größe des Flickerrauschens verantwortlich sind u. z. die von SCHOTTKY angenommene lokale Änderung in der Austrittsarbeit an der Oberfläche der Kathode und der von Lindemann und van der Ziel beschriebene Effekt. Beim Schottky'schen Vorgang ist das Rauschen bei Sättigung viel größer als bei Raumladung, weil der totale Emissionsstrom schwankt, während im zweiten Fall das Rauschen durch die Raumladung nur wenig beeinflusst wird. Ist also die Umwandlungstemperatur zu niedrig, so ist die Emissionsfähigkeit noch verhältnismäßig gering und das Rauschen ist groß, weil die Porosität der Kathode groß ist. Mit steigender Umwandlungstemperatur sintert die Kathode zusammen, wodurch also auch das Rauschen abnimmt. Die Emissionsfähigkeit steigt jedoch vorläufig an. Wird die Umwandlungstemperatur noch weiter gesteigert, was für die Emissionsfähigkeit wieder ungünstig ist, so wird jener Anteil der Kathodenoberfläche, die bei der Betriebstemperatur im Sättigungsgebiet arbeitet, wieder größer, trotz geringerer Porosität der Kathode nimmt dadurch das Rauschen wieder zu. Dieses Verhalten der Kathode erklärt also, daß das Minimum des Flickerrauschens mit dem Maximum der Emissionsfähigkeit der Kathode nahezu übereinstimmt.

Die Verfasser danken Herrn Dipl. Phys. L. Z. Nagy für die Durchführung der Messungen.

Anhang

Es werden zwei Aufnahmen von Rauschspektren gezeigt, die an Röhren mit verschiedener Kathodenporosität aufgenommen wurden. Bild 5 zeigt das Spektrum einer Röhre mit verhältnismäßig hohem Rauschen, während Bild 6 eine rauscharme Röhre darstellt. Werden die gemessenen Kurven extrapoliert, so kann der konstante Beitrag des Schrotrauschens und der frequenzabhängige Beitrag des Flickerrauschens bestimmt werden.

Es gilt folgender Zusammenhang:
Im schmalen Frequenzband Δf ist

$$U^2 = U_{\text{Schrot}}^2 + U_{\text{Flicker}}^2$$

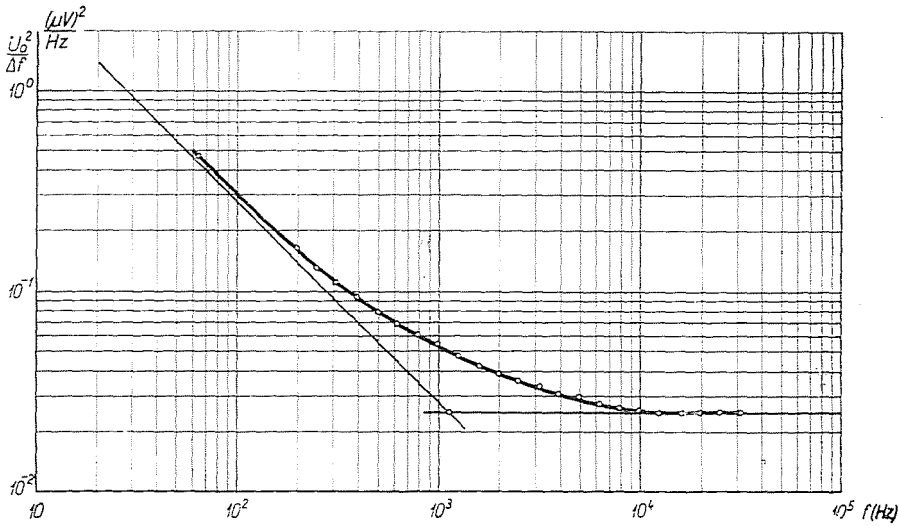


Bild 5. Rauschspektrum einer stark rauschenden Röhre. Die Ordinate zeigt das Quadrat der Rauschspannung auf 1 Hz bezogen an. Die Flickerkomponente ist bei 1000 Hz noch beträchtlich

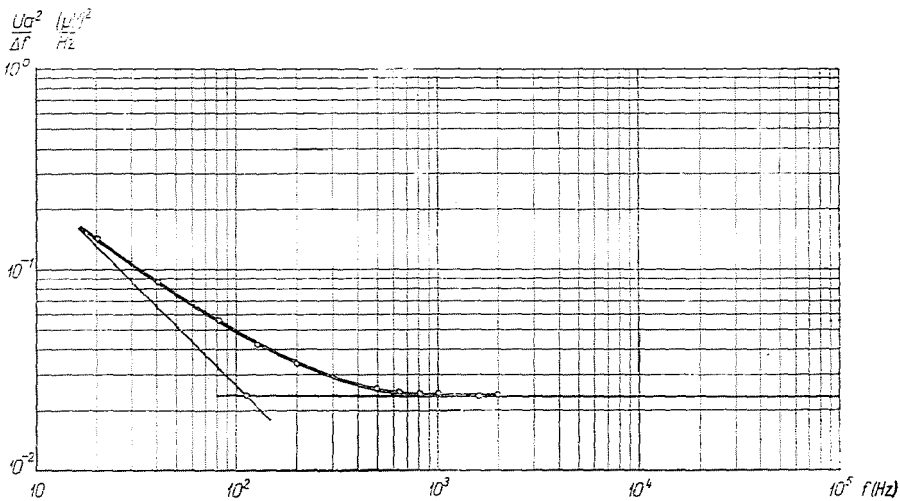


Bild 6. Rauschspektrum einer rauscharmen Röhre. Die Flickerkomponente ist bei 300 Hz schon vernachlässigbar

und auf 1 Hz Bandbreite bezogen

$$\frac{U_{\text{Schrot}}^2}{\Delta f} = c_1$$

$$\frac{U_{\text{Flicker}}^2}{\Delta f} = c_2 f^{-1}$$

Werden $\frac{U^2}{Af}$ sowie f in logarithmischen Maßstab aufgetragen, so bekommt man für beide Komponenten Gerade. Die Gerade des Schrotrauschens läuft parallel zur X-Achse, während die Gerade des Flickerrauschens um den Wert q gegen diese geneigt ist. $\operatorname{Tg} q = a \approx 1$.

Die Bilder 5 und 6 zeigen, daß U_{Schrot}^2 bei beiden Röhren gleich ist.

Die Messungen der Bilder 5 und 6 wurden an zwei Röhren vom Typ EF 86 mit folgender Einstellung gemacht:

$$U_a = 120 \text{ V}$$

$$U_{g2} = 70 \text{ V}$$

$$R_a = 20 \text{ k}\Omega$$

$$J_a = 0.5 \text{ mA}$$

Bild 6 zeigt, daß bei der rauscharmen Röhre der Beitrag der Flickerkomponente zum Gesamtrauschen über 300 Hz schon vernachlässigbar klein ist, während die schlechte Röhre (Bild 5) noch bei 1000 Hz eine beträchtliche Flickerkomponente hat.

Zusammenfassung

Die Theorie von LINDEMANN und VAN DER ZIEL, wonach die Quelle des Flickerrauschens die poröse Oberfläche der Kathode ist, wurde von den Verfassern experimentell überprüft. Es wurde dabei die Porosität der Kathode mit Hilfe der Umwandlungstemperatur eingestellt. Wiederholte Versuchsreihen ergaben einen eindeutigen Zusammenhang. Es konnte ausserdem festgestellt werden, dass die Umwandlungstemperatur für minimales Rauschen mit der Umwandlungstemperatur für maximalen Sättigungsstrom nahezu übereinstimmt.

Schrifttum

1. LINDEMANN und VAN DER ZIEL: J. Appl. Phys. **27**, 1179 (1956).
2. VALKÓ, I. P., KEMÉNY, Á. und PÁLFFY, A.: Periodica Polytechnica **3**, 104 (1959).
3. HERMANN und WAGENER: Die Oxydkathode II. Verlag J. A. Barth, Leipzig (1950).
4. FISCHER, F. and VALKÓ, I. P.: J. Appl. Phys. **29**, 1772 (1958).

I. P. VALKÓ }
F. FISCHER } Budapest, XI., Műegyetem rakpart 3. Ungarn.